

## Atıksu arıtımında membran biyoreaktörler

**Levent GÜREL, Hanife BÜYÜKGÜNGÖR\***

*Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 55139,Kurupelit, Atakum, Samsun*

### Özet

*Membran proseslerin biyolojik arıtımla birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan arıtım teknolojileri membran biyoreaktörler (MBR) olarak tanımlanmakta olup, günümüzde bir çok çalışma bu proseslerin verimliliği ve optimum kullanım koşulları üzerine odaklanmıştır. Konvansiyonel arıtım metotlarının bir takım dezavantajlarını ortadan kaldıran bu sistemler geleceğin arıtım teknolojileri arasında önemli bir yere sahip olacaktır. Membran biyoreaktörler hem araştırma hem de ticari uygulamalarda hızlı bir ilerleme kaydetmektedir. Bu arıtım prosesi konvansiyonel biyolojik arıtım prosesleri ile karşılaştırıldığında daha düşük biyolojik parçalanabilirliğe sahip olan atıklar için yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimliliğine sahiptir. Bunun yanı sıra bu sistemler konvansiyonel sistemlerden çok daha az yer kaplarlar. Bu durum özellikle tesis için yeterli alanın bulunmadığı veya arazi maliyetlerinin oldukça yüksek olduğu yerlerde bu arıtım prosesinin uygulanmasını olanaklı kılmaktadır. Membran biyoreaktörler üzerine literatürde yapılmış olan birçok çalışma mevcuttur. Membran sistemlerinde toz aktif karbon kullanımı ile yüksek verimler elde edilmiştir. Çeşitli arıtım çalışmalarında atıksuların KOİ giderim değerlerinde %80 ile 98 arasında değişen verimlere ulaşılmıştır. Giderim verimi çalışmalarının yanı sıra biyokinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla da literatürde çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Ayrıca membran kirlenmesi MBR sistemlerinin en büyük problemlerinden biri olup bu konu üzerine yapılan çalışmalara da bu makalede yer verilmiştir. Bu çalışmada membran biyoreaktör sistemleri genel olarak incelenecek ve bu sistemlerle ilgili yapılmış olan farklı çalışmalara yer verilecektir.*

**Anahtar Kelimeler:** *Membran biyoreaktör, atıksu arıtımı, biyolojik arıtım.*

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hanife BÜYÜKGÜNGÖR. [hbuyukg@omu.edu.tr](mailto:hbuyukg@omu.edu.tr); Tel: (362) 312 19 19 dahili: 1220. Makale metni 01.02.2011 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.03.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir. Bu makaleye “Gürel, L., Büyükgüngör, H., (2011) ‘Atıksu arıtımında membran biyoreaktörler’, İTÜ Dergisi/E Su Kirlenmesi Kontrolü, 21: 1, 13-23” şeklinde atıf yapabilirsiniz.

## Membrane bioreactors in the treatment of wastewater

### Extended abstract

*Biological systems are the processes designed for removal of dissolved and suspended organic substances from wastewater. A membrane bioreactor system (MBR) is the combination of a biological aeration basin (suspended growth reactor) and a membrane filtration unit.*

*In this study membrane bioreactor systems are investigated generally, and the research studies concerning MBR systems are given.*

*MBR systems have several advantages when compared with conventional activated sludge processes. The characteristics of the sludge formed in MBRs may be different from those of conventional activated sludge. While only biomass capable of forming flocs big enough to be settled in the sedimentation units can exist in the CAS process, MBR sludge may contain even single bacteria. Especially in side-stream modules where the sludge is subject to high shear forces, the existence of single bacteria is possible and the microbial floc size is reduced. Bulking sludge, as may occur in the activated sludge process, cannot affect the quality of the MBR effluent and is no problem in MBR units. The MBR technology allows the aeration tank to be operated at higher mixed liquor suspended solids (MLSS) concentrations. While in the conventional activated sludge (CAS) process the MLSS concentration is typically limited to 3–5 g MLSS/L by the sludge sedimentation properties, membranes overcome these limitations. The area required for the installation of MBR systems are less than conventional activated sludge processes. This is very important where the area costs are too high or there is no enough spaces for the installation of treatment plants.*

*In MBR systems a membrane filtration unit is used for removal of suspended solids in the aeration basin from effluent. MBRs have two main configurations: submerged or immersed and external or side-stream. There are also two modes of hydraulic operation: pumped and airlift. In an submerged MBR, the membrane module is submerged into the aeration tank and the permeate is withdrawn from the effluent side. The pressure across the membrane can be applied by suction through the membrane or by pressurizing the bioreactor. This process requires no circulation pumps thereby making it an energy saving system. Additionally, most of the submerged*

*MBRs operate at sludge ages in excess of 40 days and, consequently, the operational parameters of submerged MBR would be different from those of conventional biological wastewater systems. In the case of external membrane bioreactor systems, the membrane is independent of the bioreactor. Feed solution enters the bioreactor and contacts with biomass. Mixture formed is then pumped around a recirculation loop which contains a membrane filter. Permeate is removed from the membrane and retentate containing activated sludge returned to aeration basin. The power consumption is much lower in submerged membrane modules when compared with external modules. In submerged type there is no circulation pump and the transmembrane pressure of system is lower than external type. Submerged systems are also more compact.*

*Membrane fouling is one of the important disadvantages of membrane bioreactor systems. Fouling is the decline in the membrane permeability. Typically, transmembrane (TMP) pressure should be increased for obtaining stable flux values. Membrane fouling reduces the efficiency of membrane system by increasing TMP value. Consequently, this situation is increased operating and maintenance costs of membrane bioreactor process. Techniques of membrane fouling control can be categorized into four groups. In the first group the modification of membrane module design by optimizing hollow fibers or flat sheets packing density, the location of aerators, the orientation of fibers and diameters of fibers takes place. In the second, reduction of cake formation on membrane surfaces by controlling the filtration process below the critical flux, by air sparging in the vicinity of membranes, and by operating in intermittent mode exists. The third group is the improvement of the filtration characteristics of the mixed liquor by adding powdered activated carbon (PAC). The fourth and the last is the removal of the fouling material after its formation by back-washing, by back-pulsing and by chemical cleaning. In the light of the scientific research studies, the fouling problems in these systems will be decreased to a minimum.*

*The other disadvantage of MBR is the high operating and membrane costs. However, the membrane costs were decreased since this technique was firstly applied to wastewaters. Nowadays, the operating costs are higher than conventional methods, but this will not be a disadvantage when the strict discharge standards will become effective.*

**Keywords:** Membrane bioreactors, wastewater treatment, biological treatment.

## Giriş

Biyolojik arıtımın temel amacı, atıksuda bulunan substratların karışık mikrobik kültür tarafından bir besi kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktır. Substrat terimi atıksuda bulunabilecek organik maddeleri, nütrientleri (besi maddelerini) ve diğer maddeleri belirtmektedir. Yaygın biyolojik arıtım prosesleri, aerobik, anaerobik ve biyolojik nütrient giderim prosesleri şeklinde sınıflanmaktadır. Aktif çamur prosesinde, mikroorganizmalar tamamıyla substratlarla birlikte karıştırılırlar ve böylece büyür ve organik maddeleri stabilize ederler (Al-Malack, 2006). Havalandırma tankındaki askıda katı maddeler iyi kalitede bir çıkış suyu elde etmek için sudan başarılı bir şekilde ayrılmak zorundadır. Bu amaçla, son çıkış suyundan biyokütle-nin ayrılması için genellikle yerçekimi ile çöktürme işlemi kullanılır. Çamurun fiziksel özellikleri ve sedimentasyon prosesinin konfigürasyonu ve işletilmesi önemli bir etkiye sahiptir (Ünlü vd., 2005). Özellikle çamur süspansiyonunda aşırı ipliksi bakterilerin üremesi sonucu sedimentasyon ve yoğunlaştırma prosesi başarısızlığa uğrayabilmektedir. Bu durum çamurun ipliksi bakteriler nedeniyle şişmesi ile ortaya çıkar (Meng vd., 2006a). Var olan atıksu arıtma tesisleri, katı yasal düzenlemelere uyum sağlayabilmek için işletme performanslarını geliştirmek ve daha yüksek kalitede çıkış suyu sağlamak zorundadırlar. Endüstriyel tesislerden gelen atıksuların biyolojik arıtımında bir takım zorluklar göze çarpmaktadır. Bunlar, biyolojik katıların verimsiz bir şekilde ayrılması ve büyük hacimli biyolojik çamurların oluşması şeklinde örneklenebilir. Biyolojik flokülasyon berrak ve çökelme karakteri iyi bir çıkış suyu elde etmek için gereklidir. Biyolojik flokülasyon, organik ve inorganik kolloidlerin olduğu kadar hücrelerin de kararlı bir biyolojik flok yapısı oluşturmak suretiyle dış hücresel biyopolimerler ile yakın bir şekilde birbirine bağlanması sonucu oluşan aslında bir toplanma prosesidir. Biyoflokülasyon mekanizması arıtma prosesi esnasında yaratılan potansiyel dış karışıklıklara karşı yüksek derecede hassas bir mekanizmadır. Bu karışıklıklar, sıcaklık, pH veya organik yükleme hızındaki ani değişimler gibi fiziksel veya kimyasal bir yapıya sahip olabilir. Aktif çamur sis-

temleri fenolik bileşik karışımı ile şok bir şekilde yüklendiğinde, fenolik bileşiklerin ve diğer birçok aromatik yapıdaki organik bileşiğin biyoflokülasyon prosesini başarısızlığa uğrattığı bildirilmiştir. Giriş suyunda mevcut olabilen bazı kimyasal bileşiklere karşı biyoprosesin yüksek hassasiyeti, çıkış suyunda yüksek bulanıklığın, yüksek konsantrasyonlarda askıda katı madde konsantrasyonlarının görülmesine neden olacaktır ve böylelikle biyoreaktör içindeki aktif biyokütle miktarı azalacak ve arıtım prosesi başarısızlıkla sonuçlanacaktır. Biyoprosesin en kritik ve zor basamaklarından bir tanesi biyolojik katı maddelerin ve çıkış suyunun ayrılmasıdır (Galil ve Levinsky, 2007).

Yukarıda bahsedilenlere ilave olarak, konvansiyonel biyolojik arıtım prosesleri başka dezavantajlara da sahiptirler. Bunlar arasında; büyük alan gereksinimi, koku ve diğer emisyon problemleri yüzünden atıksuyun nüfusun olmadığı alanlara taşınma gereksinimi sayılabilir. Bu nedenle, bazı çalışmalar daha küçük ve hızlı çalışan atıksu arıtma sistemlerini geliştirme üzerine yürütülmektedir (Yıldız vd., 2005).

Son zamanlarda, membran biyoreaktör teknolojileri su arıtımında, atıksu arıtımında ve su ıslahında artan bir popülerlik kazanmıştır (Tsai vd., 2005). Membran biyoreaktörler (MBR) atıksuların ikincil arıtımı için konvansiyonel aktif çamur proseslerine karşı bir alternatiftir. Bu sistemler klasik aktif çamur prosesleriyle karşılaştırıldığında su kalitesi, güvenilirlik ve daha az yer kaplama gibi avantajlara sahiptir (Lesage vd., 2008).

## Membran biyoreaktör teknolojisi

Membran biyoreaktör (MBR) arıtım sistemleri biyolojik arıtım metotlarından biri olan aktif çamur prosesini membran ayırma prosesiyle birleştiren sistemlerdir (DeCarolus Jr. ve Adham, 2007). Reaktör, konvansiyonel bir aktif çamur prosesine benzer şekilde işletilmekte olup, bu arıtma tekniğinde son çöktürme tankına ve kum filtrasyonu gibi üçüncül arıtma işlemlerine gerek duyulmamaktadır. MBR prosesi hidrolik ve çamur alıkonma sürelerinin birbirinden farklı olmasını olanaklı kılmaktadır. Böylece tüm ça-

mur MBR içinde tutulabilmekte ve çamur yaşının yeterince uzun olması sağlanabilmektedir. Bu sistemlerde, arıtılmış çıkış suyu kalitesinin reaktör içerisindeki biyokütlenin çökebilme özelliklerinden etkilenmesi de olanaksız hale gelmektedir (Song vd., 2008). Ayrıca biyolojik arıtımın biyokütle kaybından ve şişmeden dolayı başarısızlıkla sonuçlanması da bu sistemlerde söz konusu olmamaktadır (Kim vd., 2008). MBR’de kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) üzerine kurulan madde dengesi giriş suyu KOİ’sinin yaklaşık olarak %90’ının karbondioksit oksitlendiğini ve reaktördeki askıda katı madde konsantrasyonunun çamur atılmaksızın neredeyse sabit kaldığını göstermektedir (He vd., 2006).

#### **Membran biyoreaktör sistemlerinin avantaj ve dezavantajları**

Membran biyoreaktör sisteminin avantajları arasında; organik madde gideriminde yüksek verimliliğe sahip olması, geliştirilmiş besi maddesi giderim stabilitesi, arıtımı zor olan atıklara uygulanabilmesi, düşük çamur üretimi, çıkış suyunun yüksek kalitede dezenfeksiyonu, yüksek yükleme hızı, daha az kirlenmiş çamur oluşumu ve reaktör için ihtiyaç duyulan alanın küçük olması sayılabilir (Çinar vd., 2006).

Bunun yanı sıra, membran sistemlerinin bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. MBR sistemlerinin uygulanmasına özgü kısıtlamalar, tesislerin ilk yatırım maliyetleriyle ve değişken maliyetleriyle (elektrik tüketimi ve membranların işletme süresi gibi) ilişkilidir. Bu durum bu teknolojinin özellikle büyük miktarlardaki atıkların arıtımı için uygulanması hususunda bir dezavantaj oluşturmaktadır. Diğer taraftan, MBR’nin kullanımı, çok daha katı deşarj kurları söz konusu olduğunda veya suyun ıslah edilmesi gerektiğinde daha yerinde olacaktır (Artiga vd., 2005). Özellikle bu teknoloji membran ve membran prosesi maliyetlerinin düşmeye devam ettiği sürece daha da uygun maliyetli bir hal alacaktır (Judd, 2008).

#### **Membran biyoreaktörlerde kullanılan membran modülleri**

Membran biyoreaktörlerde ya mikrofiltrasyon amaçlı (gözenek boyutu 0.05-5 µm arasında) ya

da ultrafiltrasyon amaçlı (gözenek boyutu 0.005-0.1 µm arasında) membranlar kullanım alanı bulmaktadır (Hasar vd., 2004).

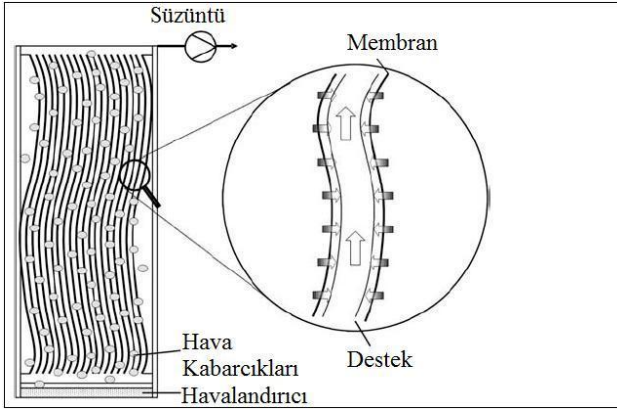
Biyokütle ayrımı için membran modülleri birtakım özelliklere sahip olmalıdır. Çamurun birikebileceği ölü bölgeler bulunmamalı, kütle transferini artırmak ve kirlenmeyi azaltmak için besleme kısmında yüksek miktarda türbülans olmalı, mekanik, kimyasal ve termal stabiliteye sahip olmalı, düşük basınç düşüşleri ortaya koymalı (50-250 mbar arasında düşük transmembran basıncı), yüksek paketleme yoğunluğuna sahip olmalı (modülün birim m<sup>3</sup> hacmi başına düşen birim m<sup>2</sup> membran alanı), kurulması ve membranın yenilenmesi kolay olmalı, modüller olmalı ve ileri ekipman ile modifiye edilebilmeli, temizliği kolay olmalı, arıtılmış suyun birim hacmi başına enerji gereksinimi düşük olmalıdır.

Hiçbir konfigürasyon yukarıda sıralanan tüm gereksinimleri karşılayamamakla birlikte atıksu arıtım uygulamalarında üç tip modül kullanım alanı bulmuştur. Bunlar, boşluklu fiber modülleri, düzlemsel modüller (plaka ve çerçeve modülleri gibi) ve tüp şeklindeki modüllerdir.

Boşluklu fiberlerin çapı birkaç yüz mikrometreden birkaç milimetreye kadar değişebilir. Modüller ya yatay bir şekilde ya da dikey bir şekilde kurulur. Bu modüller yüksek bir paketleme yoğunluğu sunar ve biyokütle içinde batık halledirler. Kirlenme kontrolü çoğunlukla membran modülünün altına yerleştirilen havalandırıcılar ile sağlanır. Sıklıkla kaba kabarcıklı havalandırma membran yüzeyindeki temizleme işleminde rol oynar, fakat aynı zamanda ince kabarcıklı havalandırıcılar da kullanılmaktadır. Boşluklu fiber modülünün şematik bir gösterimi Şekil 1’de gösterilmektedir. Membran işletimi, periyodik gevşetme ve geri yıkama gibi membran yüzeyinde biriken kirlenme tabakasını yüzeyden uzaklaştırma işlemlerini de içerebilir.

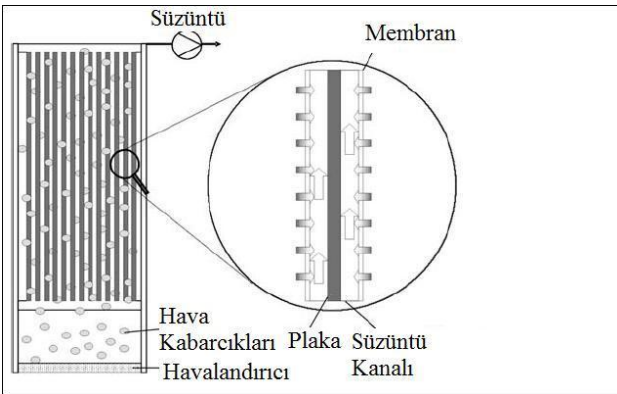
Plaka-ve-çerçeve membran modüllerinde, düzlemsel membranlar paralel bir şekilde düzenlenir ve bir plaka ile desteklenir. Modüllerdeki düz membranların farklı uygulamaları arasında;

batık dikey bir şekilde düzenlenmiş dikdörtgen plakalar, batık dönen plaka modülleri ve havalandırma tankının dışında yer alan düz membranlar sayılabilir.



Şekil 1. Bir boşluklu fiber membran modülünün şematik gösterimi

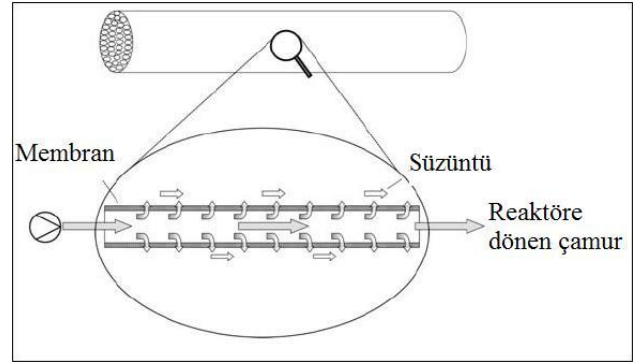
Batık modüllerdeki kirlenmenin kontrolü kaba kabarcıklı havalandırma ile elde edilir. (Dış) dikey modüller yan akış modunda işletilir. Birçok sistem periyodik olarak gevşetilir; bazıları ise geri darbeye maruz bırakılır (çok düşük basınçta). Şematik bir gösterim Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Dikey bir şekilde düzenlenmiş batık plaka membran modülünün şematik gösterimi

Tüp şeklindeki modülün şematik bir gösterimi ise Şekil 3’te verilmektedir. Ticari olarak mevcut olan tüp şeklindeki modüller çoğunlukla yan akış modunda işletilir. Tüp şeklindeki modüller 6 m’ye kadar olan uzunluklara sahiptirler. Bu yan akışlı modüller 1-4 m/s’lik akış hızlarında işletilirler. Düzenleme dikey veya yatay olabilir. Bazı sistemler kirlenme kontrolü için ilave ha-

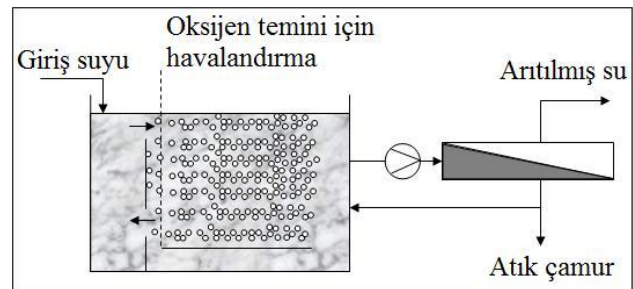
valandırma ile işletilir. Tüp şeklindeki modüller membran yüzeyinde daha doğrudan hidrodinamik kontrol sağlarlar. Batık modüller ile karşılaştırıldığında, yüzey alanı başına düşen akı yüksektir, fakat, yüksek spesifik enerji ihtiyacına ( $\text{kW.saat/m}^3$ ) sahiptirler (Cornel ve Krause, 2008).



Şekil 3. Tüp şeklindeki bir membran modülünün (yan-akış modülü) şematik gösterimi

### MBR konfigürasyonları

MBR işleminde genellikle iki tip membran konfigürasyonu kullanılmaktadır. Bunlar harici (yan akışlı) ve batık tiplerdir. Harici MBR prosesinde membran havalandırma havuzunun dışında yer almaktadır. Bu sistem MBR’nin ilk jenerasyonudur. Bu tip reaktörlere ait şematik bir gösterim Şekil 4’te yer almaktadır. Harici MBR’de, karışık sıvı askıda katı maddeleri membran modülüne pompalanır.

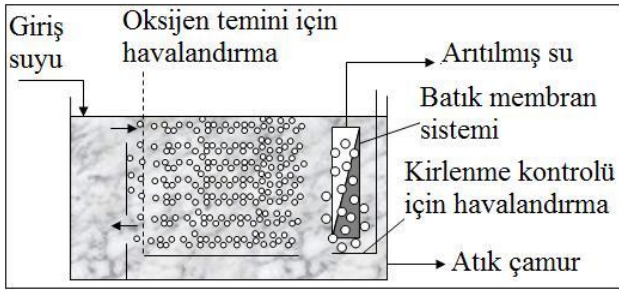


Şekil 4. Harici MBR sistemi

Bu sistemde tipik olarak tüp şeklindeki membranlar kullanılır. Kirlenme, türbülanslı bir çapraz akış meydana getiren 1-4 m/s aralığındaki iyi tanımlanmış akış hızları ile kontrol edilir. Şekil 5’te ise batık MBR sistemine ait bir şematik görünüm yer almaktadır. Bu tipte memb-



ranlar karışık sıvıya batıktır, ve süzüntü mekanik olarak veya yerçekimi etkisiyle meydana gelen akış ile emilir.

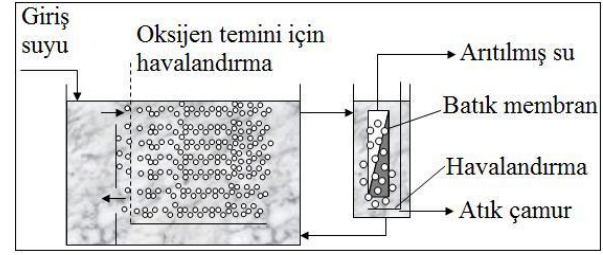


Şekil 5. Batık MBR sistemi (havalandırma tankı içerisinde)

Batık MBR sistemlerinde boşluklu fiber membranlar ve düz levha şeklindeki membranlar kullanılmaktadır (Lesjean vd., 2004). Karışık sıvının kirlenme potansiyelinden dolayı, membranlar kirlenme kontrolü gerektirirler. Batık sistemlerde, bu kontrol işlemi membran yüzeyinde çapraz akış meydana getiren kaba kabarcıklı havalandırma kullanılmak suretiyle membran yüzeyinin hava ile temizlenmesi ile sağlanır. Batık MBR prosesleri için işletme koşulları Tablo 1’de verilmektedir. Şekil 6’da ise batık tipin farklı bir uygulaması görülmektedir. Bu dizaynda, sabit bir çamur konsantrasyonu elde etmek için aktif çamur sürekli olarak geri devrettirmek zorundadır (Cornel ve Krause, 2008).

Tablo 1. Batık membranlar için işletme şartları

Parametre	Değer
Akış, L/m <sup>2</sup> saat	15-35
Transmembran basıncı, kPa	20
Biyokütle konsantrasyonu, g MLSS/L	5-25
Katı madde alıkonma süresi, gün	>20
Çamur üretimi, kg AKM / kg KOİ.gün	<0.25
Hidrolik alıkonma süresi (HAS), saat	1-9
F/M, kg KOİ / kg MLSS.gün	<0.2
Hacimsel yükleme, kg KOİ/m <sup>3</sup> .gün	≤20
Hava akış hızı, modül başına Nm <sup>3</sup> /saat	8-12
İşletme sıcaklığı, °C	10-35
İşletme pH’ı	~7-7.5
Geri yıkama sıklığı, dakika	5-16
Geri yıkama süresi, saniye	15-30
Filtrasyonda enerji tüketimi, kW.saat/m <sup>3</sup>	0.2-0.4
Membranın havalandırması, %	80-90
Süzüntü ekstraksiyonu için pompaj, %	10-20



Şekil 6. Batık membran sistemi (harici bir filtrasyon tankında)

### Membran kirlenmesi

MBR prosesinin, kirleticileri etkili bir şekilde gidermesine ve yüksek veya şok yüklemelere karşı dirençli olmasına karşın, membranın kirlenmesi halen kaçınılmaz bir engeldir. Kirlenmenin meydana gelmesi membran performansını iki şekilde etkilemektedir. Bunlardan ilki, membran yüzeyi üzerinde bir tabakanın oluşması sonucu süzüntü akışına karşı ek bir direnç meydana gelmesidir. İkincisi ise, membran gözeneklerinin tam veya kısmen tıkanması sonucu etkin gözenek boyutu dağılımının değişmesidir. MBR’deki aktif çamurun özellikleri, membranın kirlenmesinde ana faktörlerden birisidir. MBR içindeki çamur ortamı, karışık sıvı şeklindedir ve i) geniş aralıktaki canlı mikroorganizmaların oluşturduğu biyolojik floklar, ii) çözünebilen ve koloidal bileşikler içeren üst faz (süpernatant) olarak iki ana kısma ayrılır. Her elementin membran kirlenmesini etkileyen kendi fizikokimyasal ve biyolojik özellikleri bulunmaktadır (Guo vd., 2008).

Yukarıda da bahsedildiği üzere membran kirlenmesi biyolojik besleme çözeltisinin kompleks yapısından dolayı kaçınılmazdır. Fakat bu kirlenme sistem uygun hidrolik koşullar altında işletildiği takdirde en aza indirilebilir. Kritik akı kavramı (kirlenmenin olmadığı akı) kirlenmeyi karakterize etmek için bir parametre olarak ortaya çıkmıştır. Membran kritik akının altında işletildiği zaman, uygun bir temizleme sistemi ile kombine edilmiş bir membranı uzun bir süre partikül birikmesi olmaksızın veya çok az miktarda birikmenin gözlenmesiyle işletmek mümkün olmaktadır (Zhou vd., 2008).

Batık boşluklu fiber membran proseslerde, gözenekli membran içinden süzüntünün geçirilmesini sağlamak için fiberin lümen kısmına negatif

basınç uygulanmaktadır. Bu esnada, membranın dış yüzeyini temizlemesi için modülün taban kısmından hava verilmektedir. Süzüntü fiber lümenine akarken bir miktar iç basınç düşüşü meydana gelecektir. İç ve dış basınç arasındaki farktan elde edilen transmembran basıncı, çıkışta en yüksek, akışın başlangıç noktasında ise en düşük değerde olacaktır. Bu yüzden, süzüntü çıkış noktasındaki yerel akı en yüksek değerindedir, bunun sonucu olarak ta en hızlı kirlenme bu bölgede gerçekleşecektir.

Süzüntünün çıkış yaptığı nokta yüksek akı altında bir kez kirlendiğinde, sabit akışı sağlayabilmek için kirlenmiş olan tabakanın çevresine çok daha fazla miktarda su geçiş yapacak ve bu zincir reaksiyon membran kirlenmesinin fiberlerin diğer uçlarına da yayılmasıyla sonuçlanacaktır. Bu nedenle, fiberin lümen kısmındaki eksenel basınç düşüşü, fiberler boyunca eşit olmayan filtrasyon işlemi ile hızlanmış membran kirlenmesinin önlenmesi için minimize edilmelidir (Yoon vd., 2004).

MBR'lerde membran kirlenmesini kontrol etmek için kullanılan teknikler aşağıda verilmektedir:

*Boşluklu (hollow) fiberlerin veya düz levhaların paketleme sıklığını, havalandırıcıların yerlerini, fiberlerin uyumunu ve fiberlerin çaplarını optimize ederek membran modül dizaynının modifikasyonu-* Boşluklu fiber membranlar için, daha ince fiberli, düşük paketleme sıklığına sahip ve fiberlerin düşey oryantasyonuyla oluşturulmuş modüllerin membran kirlenmesini kontrol etmede daha iyi oldukları düşünülmektedir. Yapılan filtrasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlarına göre, süzüntü akışının hızı artan membran gözenek boyutu veya porozitesi ile daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. Daha büyük gözenek boyutuna sahip olan mikrofiltrasyon membranları ultrafiltrasyon membranlarından daha yüksek başlangıç kirlenmelerine maruz kalmaktadırlar.

*Filtrasyon prosesini kritik akının altında tutarak, membranların çevresine hava püskürtterek, ve membranı aralıklı düzende işleterek membran yüzeyleri üzerinde kek oluşumunun azaltılması-* Tüm membran ayırma proseslerinde membran kirlenmesi artan akıyla birlikte artış

gösterdiğinden, işletme akısı kritik akı değerinden daha düşük olmak zorundadır. İşletme akısı kritik akı değerinin altında olduğu zaman membran yüzeyinde partiküllerin birikimi etkili bir şekilde engellenebilir. Bununla birlikte, fizikokimyasal çözünmüş madde-membran materyali etkileşimleri yüzünden, MBR'ler kritik akı değerinin altında işletilse bile, membran permeabilitesi zamanla azalacaktır. Bu durumda MBR sisteminin kararlı bir şekilde işletilmesini sağlamak amacıyla diğer önleyici metotlar göz önüne alınmalıdır.

Membran yüzeyine yapılan hava püskürtme işlemi bu metotlardan birisi olup, hava kabarcıklarıyla membran yüzeyinde oluşmakta olan kek tabakası kesme gerilimi yaratılarak yüzeyden uzaklaştırılır ve böylelikle bu tabaka daha yoğun hale gelmeden sorun çözülmüş olur. Ayrıca, hava ile temizleme işleminin etkinliği kesintili emme işlemi ile daha da iyi bir duruma getirilebilir. Transmembran emme basıncının yokluğunda, tersinmez bir şekilde membran yüzeyine yapışmayan kirleticiler, konsantrasyon gradyanı yüzünden membran yüzeyinden etrafa difüze olabilir. Aralıklı işletme, membran üretkenliğini düşürdüğü için, büyük ölçekli tesislerden ziyade yüksek kirlenme potansiyeline sahip olan atıksuları arıtan küçük ölçekli MBR'lerde ekonomik açıdan daha iyi uygulanabilmektedir.

*Toz aktif karbon (TAK) ekleyerek karışık sıvının filtrasyon özelliklerini geliştirmek-* TAK biyokütle kek direncini azaltmada ve toplam partikül dağılımını daha büyük bir boyutla değiştirmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Buna ilaveten, TAK membran yüzeylerinden kek tabakasını gidermede temizleme etkisine sahip olabilmektedir.

*Geri yıkayarak, geriye darbe yaparak ve kimyasal temizleme yaparak kirletme materyalini oluşumunun ardından uzaklaştırmak-* Geri yıkama koloidal partikülleri ve hücre artıklarını membran gözeneklerinden karışık sıvı içerisine atarak ve membran yüzeyinden çamur kekini uzaklaştırarak membran modüllerinin performansını geliştirmede etkili bir yoldur. Spesifik MBR sistemlerinde, geri yıkama sıklığı ve akısı, işletme ve çevresel şartlara bağlıdır. Genellikle, geri yı-

kama, her 30-60 dakikada bir 5-30 saniye boyunca filtrasyon yönünü değiştirmeyi kapsamaktadır. Geri yıkamadan farklı olarak geriye yapılan darbe birkaç dakikalık filtrasyonun ardından yüksek sıklıkta (her iki saniyede bir) geri yıkamayı kapsamaktadır. Geriye yapılan darbenin bir dezavantajı, yüksek basınca dirençli membranların kullanımını gerekli kılmasıdır.

Kimyasal temizleme hem membran permeabilitesini geri kazanmak için hem de temizleme işleminin sıklığını azaltmak için geniş çapta kullanılmaktadır (Yang vd., 2006). Kimyasal temizleme organik tortuların giderimi için sodyum hipoklorit ve sodyum hidroksit kullanılarak, kireç ve diğer inorganik tortuları gidermek için ise asidik çözeltiler (nitrik, sülfürik ve hidroklorik asitler gibi kuvvetli asitler ve sitrik asit gibi zayıf asitler) kullanılarak gerçekleştirilir. Temizleme işleminde membran temizleme çözeltisi içerisine sokulur veya geri yıkama suyu-na temizleme çözeltisi eklenir ve membran bu çözeltiyle geri yıkama işlemine tabi tutulur. Pek çok MBR prosesinde kimyasal temizleme bakım işlemi haftalık olarak 30-60 dakikalık sürelerde gerçekleştirilir. Geri kazanma amacıyla yapılan temizleme işlemi ise filtrasyonun daha fazla sürdürülemeyeceği koşullarda yapılmakta olup, bu durumla yılda bir veya iki kez karşılaşılır. Mevcut temizlik metotlarıyla uzaklaştırılamayan tortular kurtarılamaz kirlenme olarak tanımlanmaktadır. Bu kirlenme yıllar boyunca sürdürülen işletim sonucu büyür ve sonuç olarak membran ömrünü belirler. (Radjenovic vd., 2008) Günümüzde, temizleme stratejileri hakkındaki çalışmalarda klorlu ürünlerin kullanımının önlenmesi ve membrana zarar verebilecek oksitleyici kimyasal maddelerin kullanımının azaltılması incelenmektedir. Kimyasal içerikleri bilinmeyen bazı ticari temizlik maddeleri dahi önerilmektedir. Burada önemli olan kimyasal kullanımının azaltılması ve alternatif olarak çevreye karşı daha az zararlı olan kimyasalların kullanımıdır (Cornel ve Krause, 2008).

### **Membran biyoreaktörler için uygulama örnekleri**

Membran biyoreaktörler üzerine literatürde yer alan birçok deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle membran performansının

değerlendirilmesini, membran kirlenmesinin incelenmesini ve membran üzerine yapılmış olan kinetik araştırmaları kapsamaktadır.

MBR performans değerlendirmesi üzerine yürütülmüş bir çalışmada batık membran biyoreaktörler kullanılmış ve performansın artırılması amacı ile bu reaktörlere TAK ilave edilmiştir. Çalışmalar sonucunda TAK ilave edilmiş olan sistemin normal membran biyoreaktör sisteminde daha yüksek performans gösterdiği bulunmuştur. Toz aktif karbon ilavesi membran kirlenmesini azaltmış ve daha düşük transmembran basınçlarının elde edilmesini sağlamıştır. Bu modifiye sistemle yaklaşık %96 çözünmüş organik karbon ve %95 KOİ giderimi sağlanmıştır (Guo vd., 2008).

Yapılmış olan bir başka çalışmada evsel atıksuların batık MBR sistemi ile arıtılması incelenmiştir. Deneyler sırasında reaktördeki karışık sıvı askıda katı madde konsantrasyonu 18 ile 20 g/L arasında değişmiştir. Arıtım sonunda %95 KOİ ve %82 toplam azot giderimi kaydedilmiştir (Rosenberger vd., 2002).

Membran kirlenmesini azaltmak için yürütülen bir araştırmada kirlenme kontrolü için kimyasal koagülanlar kullanılmıştır. Demir klorür, alum ve organik polimer ilavesi transmembran basınçının artışını en aza indirmiştir (Fan vd., 2007).

Membran kirlenmesi ile ilgili bir başka çalışmada alum ve demir klorürün etkileri araştırılmıştır. Tanka alum eklenmesinin membran kirlenmesini azaltmasıyla birlikte fosfor giderimi üzerine de pozitif bir etki sağladığı görülmüştür. Yaptıkları partikül boyutu analizlerinde alum eklenmesi sonucu daha büyük partiküllerin oluşması ile membran kirlenmesinin en aza indirildiği doğrulanmıştır. Demir klorürün de özgül direncin azaltılmasında etkili olduğu görülmüş ancak bu madde aluma kıyasla ortam pH'sını daha fazla düşürmüştür (Song vd., 2008).

Aktif çamur özelliklerinin membran kirlenmesi üzerine etkilerini araştırmak üzere yapılan bir çalışmada membran kirlenmesinin askıda katı madde konsantrasyonu ile üssel bir ilişkiye sahip olduğu, askıda katı madde konsantrasyonu



arttıkça çok daha fazla membran kirleticisinin reaktörde yer alacağı, çamur partikül boyutunun membran permeabilitesi üzerinde büyük etkiye sahip olduğu, toplam dış hücresel polimerik maddelerin membran permeabilitesi üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Meng vd., 2006b).

Manser ve diğerleri (2005), membran biyoreaktörlerle nitrifikasyon kinetiklerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde MBR sistemlerinde küçük flok boyutlarının oluşmasından dolayı difüzyon direncinin ihmal edilebileceğini bulmuşlardır (Manser vd., 2005).

Biokinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla Al Malack (2006) tarafından batık membran bioreaktörler kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Deney sonuçlarına göre dönüşüm oranı (Y), ölüm katsayısı ( $k_d$ ), maksimum özgül büyüme hızı ( $\mu_m$ ) ve doymuş sabiti ( $K_s$ ) sırasıyla 0.487-0.583 mg/mg, 0.151-0.0261 gün<sup>-1</sup>, 1.28-6.46 gün<sup>-1</sup> ve 289-2933 mg KOİ/L arasında yer almaktadır. Ayrıca arıtım çalışmaları sonucunda da % 80 ile % 98 arasında KOİ giderimi elde edilmiştir (Al-Malack, 2006).

Membran biyoreaktörlerle ilgili yapılmış olan diğer çalışmalardan bazıları Tablo 2’de özetlenmektedir.

## Sonuçlar

Membran biyoreaktörler arıtım teknolojileri arasında önemli bir potansiyele sahip olan sistemlerdir. Bu teknoloji, özellikle evsel atıksuların ve endüstriyel atıksuların arıtımında konvansiyonel aktif çamur proseslerine kıyasla sahip olduğu büyük avantajlarla ön plana çıkmaktadır. MBR sistemleri organik maddeleri, patojen mikroorganizmaları ve besi maddelerini atıksulardan çok yüksek verimlerle uzaklaştırabilmektedir. Günümüzde bu teknolojiyi kullanan arıtım sistemlerinin sayısı gün geçtikçe artış göstermektedir. Küçük yerleşim yerlerinin ve fabrikaların atıksularının arıtılmasında avantajlı olan bu sistemlerin uygulanması karşısındaki en büyük engellerden biri membranın maliyeti ve ortaya çıkan işletimsel kirlenme problemleridir. Yürütülen bilimsel çalışmalar ışığında zamanla membran biyoreaktörlerdeki kirlenme problem-

lerinin en aza indirilmesi mümkün olacaktır. Özellikle membran biyoreaktörlerde kullanılan çeşitli koagülan ve aktif karbon gibi maddelerle bu problem bir nebze olsun çözülmeye çalışılmaktadır. Bir diğer sorun ise membranın maliyeti ve işletme maliyetleridir. Ancak bu teknoloji uygulanmaya başladığından bu yana membran fiyatlarının düştüğü de bir gerçektir. İşletme maliyetleri ise konvansiyonel sistemlerden daha yüksek olabilir ancak özellikle katı deşarj standartlarının var olduğu bir süreçte bu bir dezavantaj olmaktan çıkacaktır.

Tablo 2. Membran biyoreaktörlerle ilgili bazı çalışmalar

Çalışmanın Konusu	Kirleticiler ve giderim verimleri (%)	Referans
Biyolojik besi maddesi giderimi	KOİ: 93 N: 67.4 P: 94.1	Yuan vd., 2008
Kirlenmiş ham atıksu arıtımı	NH <sub>3</sub> : 89.4 TOK: 28.6 ÇOK: 21.5	Tian vd., 2009
Domuz ahır atıksularının arıtımı	KOİ: 96.0 BOİ: 93.2 NH <sub>3</sub> -N: 97.0	Kornboonraksa ve Lee, 2009
Banyo atıksularının arıtımı	LAS: >99 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N: >99 TN: >90	Xia vd., 2008
Evsel atıksuların arıtılması	KOİ: 95 TN: >82	Rosenberger vd., 2002
Oksidasyon hendeklerinde performans değerlendirilmesi	NH <sub>3</sub> : 100 KOİ: 91.6 BOİ: 97	Tiranuntakul vd., 2005
Gıda işleme atıksularının arıtımı	KOİ: 94 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N: 91 TN: 74	Wang vd., 2005
Mikroaerobik MBR ile evsel atıksu arıtımı	KOİ: >93 TN: 87	Chu vd., 2006
Tuvalet atıksularının arıtımı ve yeniden kullanımı	KOİ: 90 BOİ: 99 NH <sub>4</sub> -N: 95 R: 80 B: 99.7	Fan vd., 2006
MBR üzerine çamur yaşının etkisi ve metallerin giderimi	Ag, Cd, Sn: >99 Cu: 89 Hg: >90 As: 37	Innocenti vd., 2002

LAS: Lineer alkil benzen sülfonat, TN: Toplam azot, ÇOK: Çözünmüş organik karbon, TOK: Toplam organik karbon, B: Bulanıklık, R: Renk

## Kaynaklar

- Al-Malack, M., (2006). Determination of biokinetic coefficients of an immersed membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, **271**, 47-58.
- Artiga, P., Ficara, E., Malpei, F., Garrido, J.M. ve Mendez, R., (2005). Treatment of two industrial wastewaters in a submerged membrane bioreactor, *Desalination*, **179**, 161-169.
- Chu, L., Zhang, X., Yang, F. ve Li, X., (2006). Treatment of domestic wastewater by using a microaerobic membrane bioreactor, *Desalination*, **189**, 181-192.
- Cornel, P. ve Krause, S., (2008). *Membrane bioreactors for wastewater treatment* in Li, N.N., eds, *Advanced Membrane Technology and Applications*, John Wiley&Sons, Inc, 217-238, USA.
- Çinar, Ö., Hasar, H. ve Kinaci, C., (2006). Modeling of submerged membrane bioreactor treating cheese whey wastewater by artificial neural network, *Journal of Biotechnology*, **123**, 204-209.
- DeCarolis Jr., J.F. ve Adham, S., (2007). Performance investigation of membrane bioreactor systems during municipal wastewater reclamation, *Water Environment Research*, **79**, 2536-2550.
- Fan, F., Zhou, H. ve Husain, H., (2007). Use of chemical coagulants to control fouling potential for wastewater membrane bioreactor processes, *Water Environment Research*, **79**, 952-957.
- Fan, Y., Li, G., Wu, L., Yang, W., Dong, C., Xu, H. ve Fan, W., (2006). Treatment and reuse of toilet wastewater by an airlift external circulation membrane bioreactor, *Process Biochemistry*, **41**, 1364-1370.
- Galil, N.I. ve Levinsky, Y., (2007). Sustainable reclamation and reuse of industrial wastewater including membrane bioreactor technologies: Case studies, *Desalination*, **202**, 411-417.
- Guo, W., Vigneswaran, S., Ngo, H-H., Xing, W. ve Goteti, P., (2008). Comparison of the performance of submerged membrane bioreactor (SMBR) and submerged membrane adsorption bioreactor (SMABR), *Bioresource Technology*, **99**, 1012-1017.
- Hasar, H., Kinaci, C. ve Ünlü, A., (2004). Production of non-biodegradable compounds based on biomass activity in a submerged ultrafiltration hollow fibre membrane bioreactor treating raw whey, *Process Biochemistry*, **39**, 1631-1638.
- He, S-b., Xue, G. ve Wang, B-z., (2006). Activated sludge ozonation to reduce sludge production in membrane bioreactor (MBR), *Journal of Hazardous Materials*, **135**, 406-411.
- Innocenti, L., Bolzonella, D., Pavan, P. ve Cecchi, F., (2002). Effect of sludge age on the performance of a membrane bioreactor: influence on nutrient and metals removal, *Desalination*, **146**, 467-474.
- Judd, S., (2008). The status of membrane bioreactor technology, *Trends in Biotechnology*, **26**, 109-116.
- Kim, H.S., Choung, Y-K., Ahn, S. ve Oh, H.S., (2008). Enhancing nitrogen removal of piggery wastewater by membrane bioreactor combined with nitrification reactor, *Desalination*, **223**, 194-204.
- Kornboonraksa, T. ve Lee, S.H., (2009). Factors affecting the performance of membrane bioreactor for piggery wastewater treatment, *Bioresource Technology*, **100**, 2926-2932.
- Lesage, N., Sperandio, M. ve Cabassud, C., (2008). Study of a hybrid process: Adsorption on activated carbon/membrane bioreactor for the treatment of an industrial wastewater, *Chemical Engineering and Processing*, **47**, 303-307.
- Lesjean, B., Rosenberger, S., Schrotter, J-C. ve Recherche, A., (2004). Membrane-aided biological wastewater treatment –An overview of applied systems, *Membrane Technology*, **8**, 5-10.
- Manser, R., Gujer, W. ve Siegrist, H., (2005). Consequences of mass transfer effects on the kinetics of nitrifiers, *Water Research*, **39**, 4633-4642.
- Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Li, Y., Xiao, J. ve Zhang, X., (2006a). Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, **272**, 161-168.
- Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Zhang, S., Li, Y. ve Zhang, X., (2006b). Identification of activated sludge properties affecting membrane fouling in submerged membrane bioreactors, *Separation and Purification Technology*, **51**, 1, 95-103.
- Radjenovic, J., Matosic, M., Mijatovic, I., Petrovic, M. ve Barcelo, D., (2008). *Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology* in Barcelo, D., Petrovic, M., eds *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste: Removal Technologies (The Handbook of Environmental Chemistry)*, Springer, 37-101, Germany.
- Rosenberger, S., Krüger, U., Witzig, R., Manz, W., Szwedzyk, U. ve Kraume, M., (2002). Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater, *Water Research*, **36**, 413-420.
- Song, K-G., Kim, Y. ve Ahn, K-H., (2008). Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor, *Desalination*, **221**, 467-474.

- Tian, J-Y., Liang, H., Nan, J., Yang, Y-L., You, S-J. ve Li, G-B., (2009). Submerged membrane bioreactor (sMBR) for the treatment of contaminated raw water, *Chemical Engineering Journal*, **148**, 296-305.
- Tiranuntakul, M., Jegatheesan, V., Schneider, P.A. ve Fracchia, H.L., (2005). Performance of an oxidation ditch retrofitted with a membrane bioreactor during the start-up, *Desalination*, **183**, 417-424.
- Tsai, H.H., Ravindran, V. ve Pirbazari, M., (2005). Model for predicting the performance of membrane bioadsorber reactor process in water treatment applications, *Chemical Engineering Science*, **60**, 5620-5636.
- Ünlü, A., Hasar, H., Kınacı, C., Çakmakçı, M. ve Koçer, N.N., (2005). Real role of an ultrafiltration hollow-fiber membrane module in a submerged membrane bioreactor, *Desalination*, **181**, 185-191.
- Wang, Y., Huang, X. ve Yuan, Q., (2005). Nitrogen and carbon removals from food processing wastewater by an anoxic/aerobic membrane bioreactor, *Process Biochemistry*, **40**, 1733-1739.
- Xia, S., Guo, J. ve Wang, R., (2008). Performance of a pilot-scale submerged membrane bioreactor (MBR) in treating bathing wastewater, *Biore-source Technology*, **99**, 6834-6843.
- Yang, W., Cicek, N. ve Ilg, J., (2006). State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America, *Journal of Membrane Science*, **270**, 201-211.
- Yildiz, E., Keskinler, B., Pekdemir, T., Akay, G. ve Nuhoglu, A., (2005). High strength wastewater treatment in a jet loop membrane bioreactor: kinetics and performance evaluation, *Chemical Engineering Science*, **60**, 1103-1116.
- Yoon, S.H., Kim, H-S. ve Yeom, I-T., (2004). Optimization model of submerged hollow fiber membrane modules, *Journal of Membrane Science*, **234**, 147-156.
- Yuan, L-M., Zhang, C-Y., Zhang, Y-Q., Ding, Y. ve Xi, D-L., (2008). Biological nutrient removal using an alternating of anoxic and anaerobic membrane bioreactor (AAAM) process, *Desalination*, **221**, 566-575.
- Zhou, Y., Xu, Z-L., Li, X-R. ve Bao, W-X., (2008). Study on membrane fouling behavior during synthetic refractory wastewater treatment using SMBR with hollow fiber module, *Environmental Engineering Science*, **25**, 5, 703-711.